

УДК 667.64:678.026

А. Букетов, канд. техн. наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО СПРАЦЮВАННЯ МОДИФІКОВАНИХ УЛЬТРАЗВУКОМ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

*Досліджено стійкість до спрацювання епоксикомпозитних матеріалів залежно від природи дисперсного наповнювача та ультразвукового поля. Запропоновано шляхи поліпшення властивостей полімеркомпозитних матеріалів внаслідок попередньої обробки олігомерних композицій ультразвуковим полем. Встановлено, що така модифікація гетерогенних композицій підвищує властивості завдяки зміні кінетики структуроутворення внаслідок поліпшення взаємодії на межі поділу "наповнювач-полімер". На ці процеси суттєво впливає природа добавки і режими ультразвукової обробки композицій. Експериментально доведено, що використання попередньої обробки матеріалу ультразвуковим полем дозволяє в широких межах регулювати стійкість до спрацювання захисних покриттів внаслідок керування умовами додаткового зшивання в'язучого.*

### Умовні позначення

- КМ – композитні матеріали;  
УЗО – ультразвукова обробка;  
q – концентрація наповнювача, мас.ч.;  
K – інтенсивність спрацювання

**Вступ.** Зниження спрацювання деталей машин і механізмів є одним з основних завдань сучасного машинобудування. Більша частина деталей і механізмів виходять з ладу внаслідок спрацювання робочих поверхонь при їх фрикційній взаємодії [1]. Крім того, спрацювання, у тому числі і гідроабразивне, є першопричиною руйнування обладнання внаслідок накопичення у поверхневому шарі деталей та вузлів машин технологічного устаткування дефектів та тріщин, що значно знижує їхню міцність. Вирішення цієї проблеми можливе у результаті комплексного підходу до проектування конструкцій вузлів тертя, що враховувало б можливість відновлення робочих поверхонь з покриттями на основі композитних полімерних матеріалів триботехнічного призначення [2].

Відомо [3], що одним з перспективних методів підвищення стійкості до спрацювання деталей машин і механізмів є нанесення на їхню поверхню композитних покриттів на епоксидній основі. Зазначимо, що підвищення експлуатаційних характеристик захисних покриттів досягали шляхом уведення у матрицю дисперсних і волокнистих наповнювачів. Це дозволяє у широких межах регулювати властивості композитних матеріалів (КМ). Крім того, перспективними, з наукової та практичної точки зору, є методи модифікації епоксидних композицій на попередній стадії формування матеріалу зовнішніми полями. Цікавим у цьому плані є використання ультразвукової обробки (УЗО) інградієнтів матриці і композицій у цілому, що дозволяє у подальшому суттєво підвищити когезійну міцність епоксикомпозитів.

Метою роботи є дослідження комплексного впливу дисперсного, волокнистого наповнювача та ультразвукової обробки інградієнтів композицій на стійкість до спрацювання матеріалів.

**Матеріали і методика досліджень.** Об'єктом дослідження вибрано епоксидно-діановий олігомер марки ЕД-20 і твердник - поліетиленполіамін. Як армуючий наповнювач використано базальтові, вуглецеві та скляні тканини з діаметром волокон  $d=9...12$  мкм. Для підвищення ступеня зшивання матриці та для поліпшення експлуатаційних характеристик КМ у роботі використано дисперсні частинки оксиду алюмінію, оксиду хрому і газової сажі (ГС) з дисперсністю 20...40 мкм.

Ультразвукову обробку матеріалу проводили на розробленій установці за режимами, описаними у роботі [4]. Зазначимо, що застосовували дві методики обробки

матеріалу ультразвуком. Згідно з першою – проводили ультразвукову обробку композицій за оптимальними часовими параметрами на повітрі. За другою методикою, тканини поміщали у резервуар з дистильованою водою, після чого підводили у водяне середовище хвилевід-концентратор з наконечником. Після проведення УЗО волокон, останні просушували у пічці при вакуумуванні. Це дозволило збільшити кількість кінетично-активних центрів на поверхні тканин. На останньому етапі для отримання позитивних результатів використовували ультразвукову обробку композицій і тканин незалежно.

Відносно стійкість КМ до гідроабразивного спрацювання визначали за стандартною методикою за допомогою відцентрового прискорювача (ГОСТ 23201-78), що дозволяє моделювати реальні процеси спрацювання деталей. Швидкість обертання ротора відцентрового прискорювача становила 3000 об./хв. Як гідроабразивну суспензію використано суміш технічної води і абразивних частинок у співвідношенні 5:1. Випробування зразків розміром 20x10x4мм проводились при зміні кута атаки в інтервалі  $\alpha=30\dots90^\circ$ . Як еталон для порівняльних характеристик досліджуваних матеріалів вибрано сталь Ст.3, яка має широкий діапазон використання при виготовленні несучих конструкцій та механізмів технологічного обладнання у машинобудуванні.

**Обговорення експериментальних результатів.** На попередньому етапі проводили дослідження впливу УЗО композицій при різних концентраціях дисперсного наповнювача на стійкість до спрацювання епоксикомпозитів. Експериментально встановлено, що при збільшенні вмісту дисперсних частинок ( $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ , газова сажа) у епоксидному в'язучому стійкість до спрацювання захисних покриттів зростає (табл. 1). Максимальну стійкість до спрацювання ( $N = 0,68\dots0,74$ ) спостерігали у полімеркомпозитах, наповнених газовою сажою (ГС), при концентраціях 60...80 мас.ч. на 100 мас.ч. матриці. Більш вагомий вплив вказаного наповнювача на значення відносної стійкості до спрацювання КМ пояснюють значною когезійною міцністю композитів з частинками цього наповнювача, що підтверджено дослідженнями фізико-механічних властивостей досліджуваних матеріалів. Крім того, зазначимо, що майже в усіх випадках, незалежно від концентрації і хімічної природи наповнювача, попередня УЗО олігомерних композицій забезпечує підвищення стійкості до спрацювання КМ на 20...25%. Методом електронної мікроскопії встановлено, що вказаний ефект зумовлений поліпшенням міжфазної взаємодії між компонентами гетерогенної системи за рахунок утворення під впливом УЗО активних радикалів і їх рекомбінації у подальшому при зшиванні матеріалу. При цьому утворюється композит з більш зшитою структурою, що позначається на стійкості до спрацювання КМ.

Крім того, відомо [5], що спрацювання КМ зумовлено сукупністю фізико-хімічних процесів у ділянці контакту абразивних частинок з поверхнею матеріалу, що призводить до двох видів руйнування матеріалу: мікрорізання і втоми поверхневого шару при багатократному його деформуванні абразивними частинками. Інтенсивність та домінуючий вплив кожного з процесів залежить від структури полімеркомпозитів, природи та концентрації наповнювача. Встановлено, що уведення в епоксидну матрицю частинок ГС та, частково, оксиду хрому забезпечує ефективне проходження механічних процесів мікрорізання, що характерно для спрацювання більш твердих та жорстких КМ (рис. 2).

Таблиця 1 - Вплив ультразвукової обробки, концентрації наповнювача і кута гідроабразивного потоку на відносну стійкість до спрацювання епоксикомпозитів

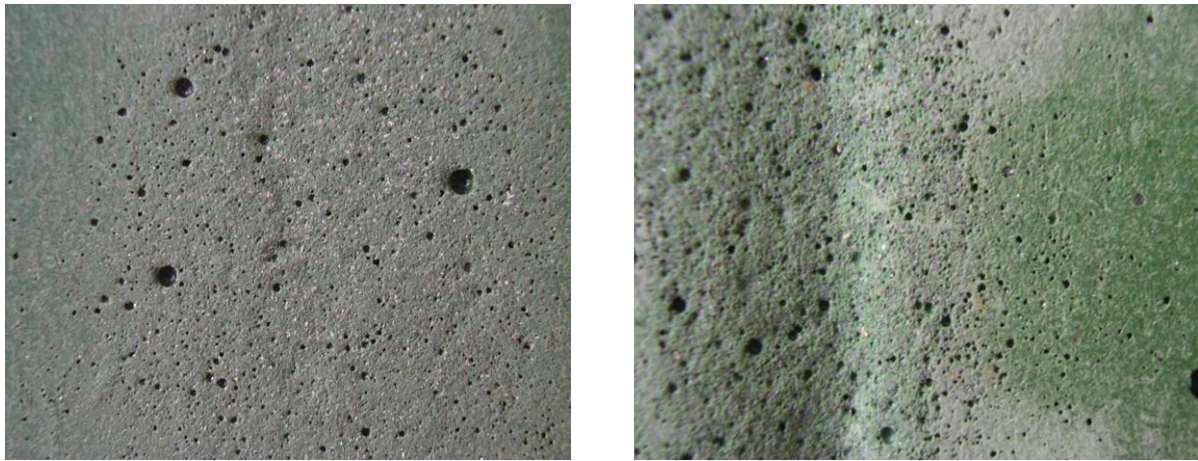
| Наповнювач                     | Концентрація наповнювача, $q$ , мас.ч. | Відносна стійкість до спрацювання, N |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                |                                        | Кут атаки, град.                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                                |                                        | 30                                   |      | 45   |      | 60   |      | 75   |      | 90   |      |
|                                |                                        | -                                    | УЗО  | -    | УЗО  | -    | УЗО  | -    | УЗО  | -    | УЗО  |
| матриця                        |                                        | 0,28                                 | 0,29 | 0,26 | 0,27 | 0,20 | 0,23 | 0,16 | 0,17 | 0,19 | 0,22 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20                                     | 0,32                                 | 0,37 | 0,28 | 0,32 | 0,24 | 0,25 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,27 |
|                                | 40                                     | 0,36                                 | 0,42 | 0,33 | 0,37 | 0,30 | 0,31 | 0,26 | 0,27 | 0,29 | 0,29 |
|                                | 60                                     | 0,52                                 | 0,58 | 0,47 | 0,51 | 0,42 | 0,44 | 0,36 | 0,37 | 0,39 | 0,41 |
|                                | 80                                     | 0,67                                 | 0,70 | 0,60 | 0,65 | 0,54 | 0,57 | 0,47 | 0,49 | 0,50 | 0,52 |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20                                     | 0,37                                 | 0,44 | 0,32 | 0,37 | 0,25 | 0,27 | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,28 |
|                                | 40                                     | 0,39                                 | 0,46 | 0,34 | 0,38 | 0,29 | 0,33 | 0,24 | 0,25 | 0,28 | 0,30 |
|                                | 60                                     | 0,48                                 | 0,54 | 0,42 | 0,44 | 0,36 | 0,39 | 0,32 | 0,36 | 0,37 | 0,42 |
|                                | 80                                     | 0,56                                 | 0,62 | 0,52 | 0,56 | 0,42 | 0,47 | 0,40 | 0,42 | 0,46 | 0,49 |
| Газова сажа                    | 20                                     | 0,40                                 | 0,46 | 0,35 | 0,39 | 0,32 | 0,37 | 0,30 | 0,33 | 0,34 | 0,38 |
|                                | 40                                     | 0,52                                 | 0,58 | 0,50 | 0,55 | 0,46 | 0,49 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,50 |
|                                | 60                                     | 0,68                                 | 0,75 | 0,59 | 0,63 | 0,54 | 0,59 | 0,49 | 0,52 | 0,55 | 0,59 |
|                                | 80                                     | 0,74                                 | 0,82 | 0,69 | 0,72 | 0,64 | 0,68 | 0,58 | 0,58 | 0,64 | 0,69 |

**Примітка.**

“-” – матеріал без обробки; “УЗО” – ультразвукова обробка композицій.

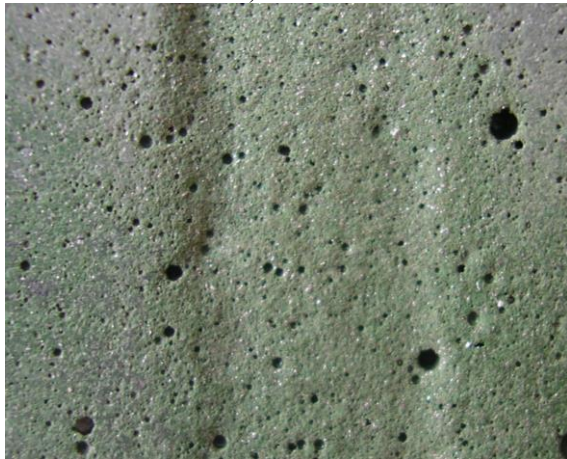
Методом електронної мікроскопії підтверджено, що багатократні деформації КМ в результаті мікроударів абразивними частинками зумовлюють утворення на поверхні мікророзривів, площина яких перпендикулярна до напрямку руху гідроабразивної суміші. У такому випадку на поверхні контакту виникають канавки, які мають орієнтацію у напрямку вектора швидкості ковзання гідроабразивного потоку [5]. Переважно вказаний механізм вносить незначний вклад у процес спрацювання порівняно з механізмом пластичного деформування, який є домінуючим для матеріалів, що наповнені дисперсними частинками Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 1). При цьому окремі абразивні частинки під впливом значного номінального тиску гідроабразивного потоку вклинюються у поверхневий шар композитного матеріалу, пластично деформуючи при цьому епоксидну матрицю. Внаслідок цього утворюється область деформації стиску (попередню ділянку контакту) та деформація розтягу (позаду ділянку контакту), що призводить до утворення різної величини мікророзривів та пластичних деформацій [5]. Під впливом дотичної сили гідроабразивного потоку абразивна частинка разом з частиною полімера видаляється з основного матеріалу. Багатократне деформування полімеркомпозитів, що містять частинки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в результаті подальшого спрацювання призводить до втомного руйнування епоксидного композиту. Це зумовлює утворення нових мікророзривів. З часом руйнування локалізується на тих ділянках КМ, які мають найбільшу густину мікророзривів. Мікророзриви, які спостерігали методом електронної мікроскопії на поверхні зразків КМ, наповнених Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, розміщені перпендикулярно до напрямку руху абразивних частинок, причому рисунок поверхні спрацювання зберігається сталим і після повторних досліджень.

На другому етапі досліджень визначено вплив незалежно УЗО тканин і композицій з дисперсними частинками на відносну стійкість до спрацювання епоксикомпозитів. Зазначимо, що на попередній стадії формування матеріалу проводили ультразвукову обробку скляної, вуглецевої та базальтових тканин у водяному середовищі і незалежно епоксидних композицій з дисперсними частинками газової сажі за режимами, описаними у методиці. Результати експериментальних досліджень тришарових композитів показано на рис. 2.



а)

б)



в)

Рисунок 1 - Вигляд поверхні після гідроабразивного руйнування при куті атаки гідроабразивної суміші 45° композитів, що містять: а) газова сажа; б) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; в) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Встановлено, що з підвищенням концентрації дисперсних частинок ГС інтенсивність спрацювання КМ знижується незалежно від природи тканини до критичної концентрації дисперсної добавки. Показано, що оптимальний вміст дисперсного наповнювача становить 40...60 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера, оскільки подальше зростання концентрації вказаної добавки не забезпечує суттєвого зменшення інтенсивності зношування досліджуваних матеріалів.

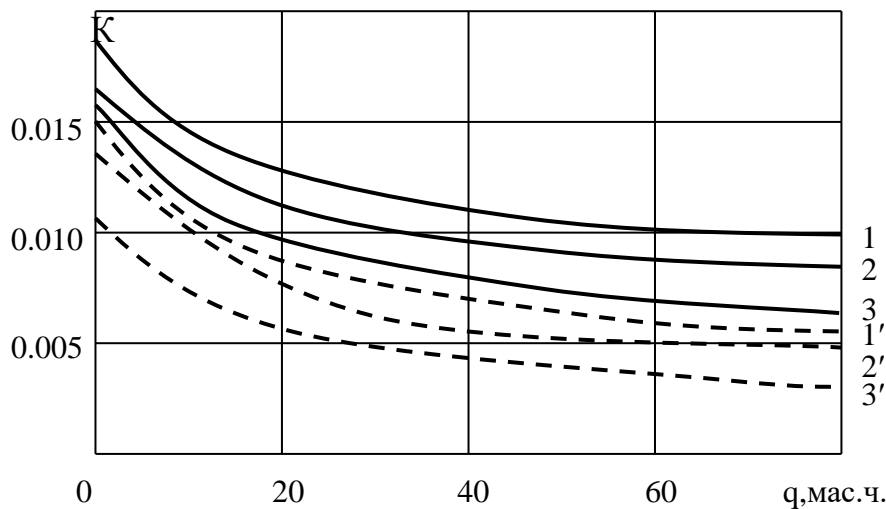


Рисунок 2 - Вплив ультразвукової обробки тканин і концентрації додаткового дисперсного наповнювача (газова сажа) на інтенсивність спрацювання (К) КМ при куті атаки гідроабразивної суміші 45°: 1,1' - матеріал у присутності скляної тканини; 2,2' - матеріал у присутності вуглецевої тканини; 3,3' - матеріал у присутності базальтової тканини. Суцільною лінією позначено матеріали без попередньої обробки; штриховою – матеріали після ультразвукової обробки волокнистого наповнювача і олігомерних композицій з дисперсними частинками газової сажі

Зазначимо, що використання як армуючої добавки базальтової тканини суттєво зменшує (на 26...30%) інтенсивність спрацювання КМ порівняно з вуглецевою і скляною тканиною. Отримані результати досліджень корелюють з результатами фізико-механічних випробувань вказаних епоксикомпозитів [4]. Це пояснюють впливом армуючого наповнювача на структуроутворення при зшиванні КМ. Крім того, важливим є аналіз впливу УЗО на стійкість до спрацювання КМ. Встановлено, що в усіх випадках після УЗО тканин інтенсивність спрацювання знижується на 35...40 % порівняно з вихідним матеріалом. Це, у першу чергу, зумовлено впливом на когезійну міцність КМ і ступінь зшивання матриці у поверхневих шарах активованих ультразвуком тканин, що, у свою чергу, позначається на інтенсивності спрацювання "гібридних" матеріалів.

**Висновки.** Отже, результати проведених досліджень показують високу стійкість до спрацювання полімеркомпозитних матеріалів на основі епоксидних смол, наповнених тканинами і дисперсними частинками. Експериментально встановлено, що механізм спрацювання наповнених епоксидних матеріалів зумовлений фізико-хімічними процесами на поверхні композитів, визначальними з яких є процеси мікрорізання і пластичного деформування матеріалу. При цьому основними факторами, що забезпечують підвищення стійкості до спрацювання КМ є: природа та концентрація наповнювача, когезійна міцність композитів і спосіб ультразвукової модифікації інградієнтів матриці і наповнювача ультразвуковим полем.

Результати проведених досліджень дозволили розробити технологічні методи та способи підвищення стійкості КМ до спрацювання та рекомендувати розроблені епоксикомпозитні матеріали для захисту технологічного устаткування з довговимірними поверхнями складного профілю від спрацювання. Це забезпечить збільшення довговічності роботи деталей та вузлів машин внаслідок підвищення їхньої стійкості до спрацювання та багатократного відновлення зруйнованих поверхонь захисних покриттів, що зменшує потребу у новому устаткуванні.

*In the work the possibility to use modified resin ED-20 as the basis of polymeric matrix for making polymeric-composition protective covering is examined. Existence of chemical and physical links between active groups of epoxy resin and pad is determined due to the use of IR spectroscopy methods.*

### **Література**

1. Крагельский И.В. Трение и износ.-М.:Химия,1968.-480 с.
2. Стухляк П.Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий.-Тернополь: Збруч, 1994.-180 с.
3. Кальба Е.Н., Кондратюк В.Л., Оверко И.В., Помелуйко А.П. Полимеркомпозиционные износ- и коррозионностойкие покрытия для защиты деталей сельхозмашин // Лакокрасочные материалы и их применение. - №1. – 1991. – С.43-44.
4. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Чихіра І.В., Микитишин А.Г. Епоксикомпозити. Вплив ультразвукової обробки волокон у водяному середовищі на релаксаційні процеси // Хімічна промисловість України.- 2005.-№3.-С.29-34.
5. Богданович П.Н., Прущак В.Я. Трение и износ в машинах.-Минск: Высшая школа, 1999.-376 с.

*Одержано 11.11.2005 р.*